

球形タンク内液体水素の蒸発率に及ぼす Sloshing の影響

小田原 悟[†]

Effect of Sloshing on Boil Off Rate of Liquid Hydrogen in Spherical Tank

Satoru ODAHARA

In order to develop the hydrogen energy usage technology for the next generation, it is an important issue to reduce a boil off vapor rate, BOR of liquid hydrogen LH_2 , in a container of a tanker, obtained by abundant wind turbine electrolysis from overseas. In this study, a swaying sloshing oscillation experiment was conducted with using an acrylic spherical container. The movement of liquid surface of the water in the half-full spherical tank was recorded by digital camera. The response of wave amplitudes for several frequency ratios was measured under the conditions of the several oscillating amplitudes. The wave amplitudes of oscillating spherical tank were able to be predicted by first modal linear analysis. In addition to the sloshing phenomenon, thermal forced convection phenomenon between the tank wall and liquid surface was roughly estimated as a coupled problem. The BOR can be larger with intense movement of liquid surface in the spherical tank under the resonant sloshing condition. The importance of carrying out the actual proof examination using renewable energy power generation equipment was also discussed.

Keywords: Liquid Hydrogen, Boil off Rate, Sloshing, Spherical Tank, Swaying, Swirling, Thermal Convection.

1. 緒 言

南米のパタゴニア地方で風力発電により製造した水素をアフリカ喜望峰、インド洋を経て日本へ 22,000km の距離をタンカー輸送することが 2030 年までに実現可能である⁽¹⁾。日本本土内陸部で最も風況の優れた場所でも年平均風速 6.0m/s 程度であるのに対し、パタゴニア地方では太田ら⁽²⁾の風況調査によると年平均風速 10m/s を超えるとされている。水素を製造するための電力エネルギーは風速の約 3 乗に比例するので、南米での一定期間の水素製造量は風車 1 機あたり日本の場合の $(10/6)^3=4.6$ 倍以上になる。しかも、日本では風向の著しい変化や台風のために風車には極めて大きい負荷変動が生じるが、パタゴニアでは年間を通して偏西風が比較的一定なので、風車の設計やメンテナンスが容易となる。日本国内での風車の破損事例は近年社会問題となっており、強度設計の段階で過度に部材寸法が大きくなり、発電効率の低下を招いている。したがって、国内での風力エネルギーを利用した水素製造よりも、パタゴニアで製造した水素を輸入運搬するほうが経済的にも割に合う時代が到来する⁽³⁾。近い将来、パタゴニア地方は南米のクウェートと呼ばれるようになるであろう⁽⁴⁾。

水素は燃焼の際に温室効果ガスを排出せず、水を資源とするので地球上に無尽蔵に存在する。したがって、地球温暖化防止および化石燃料枯渇の問題解決の有力な手

段として、水素エネルギーの利用技術が近年特に注目されている。

また、水素の運搬方法としてはエネルギー密度が大きい点で液体水素 LH_2 の状態でのタンカー輸送が最も有利である。 LH_2 の運搬技術についての研究報告⁽⁵⁾⁻⁽¹⁰⁾のなかで、Sloshing による容器内の圧力変動および蒸発挙動に関する研究は NASA のロケット推進材としての LH_2 の研究^{(9),(10)}のほかはあまりない。水素エネルギー利用技術の開発が急がれる今日、 LH_2 の Sloshing による温度上昇にともなう蒸発量の低減方法などの研究が不十分であると指摘されている⁽⁸⁾。宇宙開発分野においてロケットの液体燃料タンクはせいぜい数分程度の極めて激しい運動に耐えられるように設計すればよい⁽¹¹⁾。しかしながら、図 1 に示すようにパタゴニアからタンカーで 20 日間かけて海上輸送する間に海象によっては球形タンク内の -253°C の LH_2 に激しい運動が生じると予想されるので、球形容器内の Sloshing による相変化現象の解明が今後の水素エネルギー技術開発にとって極めて重要である。

神谷ら⁽⁶⁾は LH_2 コンテナの陸上輸送トレーラーの Sloshing 現象に関する解析的研究を行っている。

また、LNG に比べて LH_2 の蒸発量は単位熱量あたり 10 倍にもなるので、既存の LNG 技術を参考にしながら海上輸送時の LH_2 の蒸発量をいかに低減するかが重要となる。

ところで、水の常温の Sloshing についての実験的研究^{(12),(13)}は多い。著者らの基礎的な実験的研究⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾

[†]鹿児島工業高等専門学校 機械工学科

Length: 330 m
 Breadth: 64 m
 Depth: 26 m
 Draft: 14 m
 Main Engine: 40,000PS×2
 Tank Capacity: 200,000 m³
 Distance: 22,000 km
 Speed: 20~25Kt
 Boil Off Rate: 0.2~0.4%/day

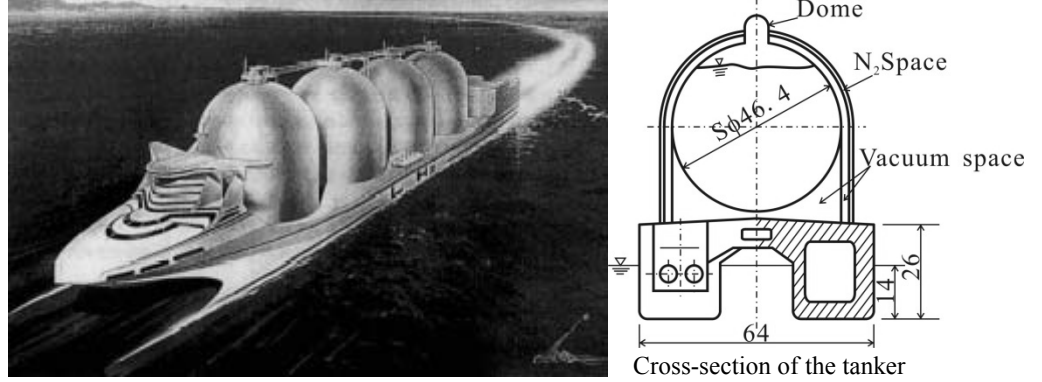


Fig. 1 General arrangement of liquid hydrogen tanker^{(3),(5)}.

によると、1 次の振動モードのみに着目した線形解析によって実験の衝撃圧力値をある範囲の精度で推定できることが明らかとなった。球形タンクの場合 Sloshing による壁面への衝撃圧はほとんど生じない。化学燃料のタンクが球形である理由の一つが Sloshing 防止である。しかし、壁面に衝撃圧は生じなくとも極低温の燃料タンクが激しく運動することによる液体が相変化や温度上昇にともなう過度の高圧など危険を予め推定することは重要と考える。

一方、宇宙開発の場合のような数分間の液体燃料の内部運動とは異なり、海上輸送タンカーの場合は数十日間の船体揺動に起因する Sloshing によってタンク内の液体運動や相変化をとらえた研究はほとんどない。また、航行中に蒸発によって積載量が減少すると液体の固有振動数が変化し、タンカーの揺動周波数と合致すると共振が起こる危険性がある。したがって、この問題は振動や構造強度のみでなく熱工学的アプローチも重要なので、構造強度・振動工学・熱工学の境界領域の連成現象としてとらえる必要がある。

そこで、本研究では南米からの LH₂ の海上輸送を想定し、運搬の際に問題となる球形タンクの Sloshing による相変化の挙動に着目し、LH₂ の周期的揺動運動に伴う蒸発率 BOR の見積もり方法を提案する。また、水半載の球形タンクの Sloshing による液面振幅を実験的に計測し、線形解析の推定方法の妥当性について検証した。

なお、風力水素の運搬技術⁽¹⁸⁾については LH₂ のみでなく圧縮水素・有機ハイドライド・アンモニアなど他の形式での手法が多く研究されているが、LH₂ が最もエネルギー密度が大きいので将来有望な技術と捉え着目することにした。

2. 球形タンク内の Sloshing による液面運動

球形タンク内液面運動の厳密な非線形解析解の計算は困難である。そこで、本研究では第1次モードのみに着目した解析法の例として以下の Budiansky (1960)⁽¹⁹⁾の等角写像に基づく数値解析の結果を利用した線形解析をする。球形タンクが水平方向に周期的強制力を受ける場合の容器液面の壁面に沿う波高 η [m] が以下の式で表される。

$$\ddot{\eta} + \omega_n^2 \eta = F \quad (1)$$

ここで、 ω_n は球形タンク内液面振動の固有角振動数 [rad/s] で以下の式で定義される。

$$\omega_n = \sqrt{\lambda_n \frac{g}{R}} \quad (2)$$

g は重力加速度[m/s²]、 R は球形タンクの内半径[m]、 λ_n は図2で水深 h [m] と直径 $2R$ との水深比 $h/2R$ によって変化する第1次モードの固有値である。また、 F は単位質量あたりの液体に作用する周期的加振力[m/s²]で

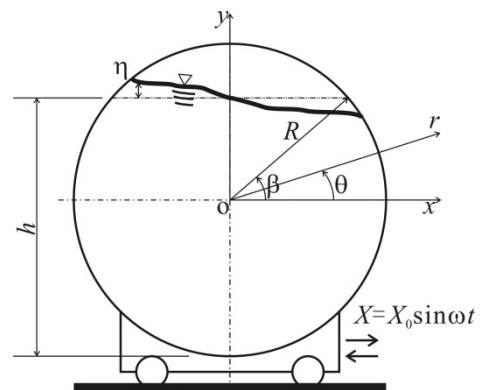


Fig. 2 Oscillated spherical tank with non-full liquid. η : Wave height amplitude[m], $h/2R$: Water depth ratio, X_0 : Oscillated amplitude [m].

ある．式(1)は液体の持つ運動エネルギーやポテンシャルエネルギーに基づく Lagrange 方程式から導かれた運動方程式である．液面の固有振動モード係数を C_n , D_n とし，容器の揺動変位を $X = X_0 \sin \omega t$ [m]，加速度を $\ddot{X} = -\omega^2 X_0 \sin \omega t$ ， ω を加振角振動数 [rad/s] とすると F は以下の式で表される．

$$F = \lambda_n a \left(\frac{D_n}{C_n} \right) \ddot{X} = F_0 \sin \omega t \quad (3)$$

すなわち， $F_0 = -\lambda_n a (D_n/C_n) \omega^2 X_0$ となる．ただし， a は図 2 で定義され， $a = \cos \beta$ ， β : x 軸から液面・壁面の交点までの角度 [deg.] とする．

本研究では周期的外力による共振点近傍の液面の挙動に着目するので，共振時すなわち $\omega \cong \omega_n$ でも液面の振幅 η が有限の値となるようにする．すなわち，次式のように式(1)に減衰項を付加する．

$$\ddot{\eta} + c\dot{\eta} + \omega_n^2 \eta = F \quad (4)$$

c は波高速度 $\dot{\eta}$ に関する抵抗係数，すなわち液面振動の減衰係数である． $F=0$ のとき，すなわち，液面の減衰自由振動の場合の減衰比を ζ とおくと $\zeta = c/(2\omega_n)$ と表される．

揺動振動数 ω と固有振動数 ω_n との比を振動数比 $\Omega = \omega/\omega_n$ とすると，式(4)から強制振動の定常応答 $\eta(t)$ が以下のように表される．

$$\eta = \eta_0 \sin(\omega t + \psi) \quad (5)$$

$$\eta_0 = \frac{F_0/\omega_n^2}{\sqrt{(1-\Omega^2)^2 + 4\zeta^2\Omega^2}} \quad (6)$$

$$\psi = -\tan^{-1} \left(\frac{2\zeta\Omega}{1-\Omega^2} \right) \quad (7)$$

減衰比 ζ を文献(9)から推定する．推定式は以下となる．

$$\zeta = \frac{1}{2\pi} \cdot 0.08347 B^{1/2} \frac{1+0.92(1-\frac{h}{2R})}{2.92(1-\frac{h}{2R})} \quad (8)$$

$$B = \frac{10}{2\sqrt{2}} \nu R^{-3/2} g^{-1/2} \quad (9)$$

式(8), (9)によると減衰比 ζ は動粘性係数 ν [m²/s] や内半径 R ，重力加速度 g ，水深比 $h/2R$ によって変化する．ただし，この関係式は液面の減衰自由振動の第 1 モードのみに着目したものである．

3. 水半載球形タンクの Swaying Sloshing 波高の計測実験

球形タンクの強制加振 Sloshing による液面波高振幅の周波数応答特性に関する実験は Budiansky⁽¹⁹⁾ や

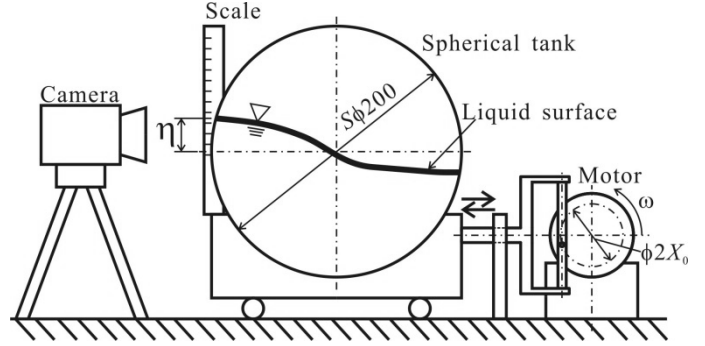


Fig. 3 Experimental equipment of swaying sloshing with half-full water spherical tank.

NASA⁽⁹⁾ 以外にはあまりない．そこで，式(2)～(9)の妥当性の検証を目的として，以下の実験を行った．

図 3 に示すように，モータ駆動の往復揺動機構を組み込まれた実験装置を用いて，Swaying 強制揺動による液面 Sloshing の波高計測実験を行った．揺動振幅 X_0 は $X_0 = 5.0$ mm または $X_0 = 7.5$ mm とした．内径 200 mm のアクリル製球形水半載容器の波高の変動を計測するために，ビデオカメラを図 3 のように設置した．映像から各揺動振動数 f [Hz] に対する波高の最大値 η_0 を読み取った．波高 η_0 が安定するまで数十秒間液面運動させたあと，5～10 秒程度撮影した．液面が図 2 の z 軸方向への 3 次元的な波を含むような運動とならないように容器の揺動方向が重力方向と完全に垂直となるように水平器で装置土台を微調整した．実際の液面の様子は砕波や飛沫が多少起こって超非線形現象となっていたが，波高 $\eta_0 < 0.1$ m のあまり激しくない液面運動の場合には第 1 次モードのみの液面運動が生じているとみなして現象を解析的にとらえることとした．装置の揺動振動数 f [Hz] はインバータによって微調整し， $f = 0.8 \sim 2.8$ Hz の範囲で 0.2 Hz ごとに変化させて設定した．式(2)より固有振動数は $f_n = 1.98$ Hz である．

図 4 に波高 η_0 の周波数応答特性を示す．横軸には容器の揺動振動数 f [Hz] を液体の固有振動数 $f_n = \omega_n/2\pi$ [Hz] (式(2))で除した無次元振動数比 $\Omega = f/f_n$ とする．計測値 Exp. ○, □ に対して式(2)～(9)による解析値 Cal. —, --- が小さい値であることが分かる．この原因は解析の際基礎となる液面の運動方程式において非線形項を無視しているせいである．ただし，解析の際の減衰比 ζ は $\zeta = 0.0176$ とした．この値は本実験装置による波高 η_0 減衰自由振動から得たものであり，式(8), (9)から計算される $\zeta = 2.51 \times 10^{-3}$ よりも大きい値である．その理由は減衰自由振動の波面形状に 2 次のモードが含まれており，1 次モードとの干渉が生じたせいであることと，容器の内面の粗さと流体粘性によって表面

に生じる境界層との相互関係による影響⁽²⁰⁾などが考えられる。なお、外力 F_0 の計算の際のモード係数は半載すなわち水深比 $h/2R=0.5$ のときの値とし、それぞれ、 $\lambda_n=1.57$, $C_n=0.476$, $D_n=0.401$ とした。 F_0 は絶対値をとった。

図 4 において共振点 $\Omega=1.0$ の近傍の波高 η_0 が $\eta_0=0.1\text{m}$ となり液面が天頂に達して Swirling が生じた。揺動振幅 X_0 が大きい場合、波高 η_0 が大きくなる傾向は計測、解析ともにほぼ同様であった。また、 $\Omega>1$ で波高 η_0 の計測値が解析値に比べてかなり大きい値となった。これは、激しい液面運動にともなう砕波により映像から読み取った波高が大きめの値になったものと考ええる。

本実験により球形容器内の液面の波高の周波数応答特性を大体推定できるものとし、以下の議論において式(2)~(9)を用いた解析の手法を利用する。

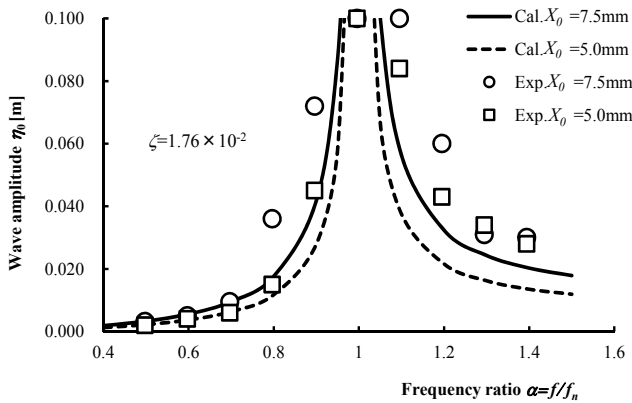


Fig. 4 Frequency response of wave amplitudes η_0 calculated and experimental values for swaying sloshing of water spherical tank, X_0 : Oscillation amplitudes, ζ : Damping ratio.

4. LH₂ 運搬船球形タンク内の Sloshing による相変化の推定

次に、LH₂ の海上輸送時のタンク内の Sloshing による相変化現象を推定する。Sloshing によって液面が激しく運動すると壁面との強制対流による伝熱で LH₂ が蒸発して水素ガスへと相変化することが予想される。タンカーは南米パタゴニアから日本までの 22,000km の距離をおよそ船速 25kt (≒45km/h) で 20 日間かけて航行する^{(1), (2), (5)}。その間に液体水素がどのような周期的外力により液面運動をするかについては海象や気象条件によって大きく変化する。そこで、液面振動と伝熱との連成シミュレーションによりどのような条件で液体水素の相変化が顕著になるかに注目し、BOR の変

化を以下のように概算してみる。

まず、初期充填時の球形タンクの液深比は $h/2R=0.90$ とする。これは初期の球形タンク内の LH₂ の充填率 $\eta_0=97.2\%$ に相当する。海象や海流の方向によって異なるが、ここでは、海上での波の周期 T_s を $T_s=4\sim7\text{sec.}$ と想定する⁽²¹⁾。図 1 の双胴船は単胴船と比べて一般に Rolling や Pitching が生じにくい構造である⁽²²⁾。したがって、船体の振動モードとして Swaying や Surging を想定し、タンクの水平方向の揺動振幅 X_0 を $X_0=0.1\text{m}$ 程度と想定する。壁面に沿う液面の流速を v_β とすると、液深比 $h/2R=0.9$ 程度のとき、波高の速度 $\dot{\eta}$ に対して v_β が $v_\beta \cong \dot{\eta}$ となるものと仮定する。

式(5)より波高 η が $\eta = \eta_0 \sin(\omega t + \psi)$ のとき波高の速度 $\dot{\eta}$ は $\dot{\eta} = \omega \eta_0 \cos(\omega t + \psi)$ となる。ここで、 η_0 の推定の際の液面振動の減衰比 ζ は式(8), (9)より $\zeta=6.93 \times 10^{-5}$ となるが、Sloshing によって LH₂ が蒸発すれば液深比 $h/2R$ が変化するので、減衰比 ζ も時々刻々と変化する。ただし、LH₂ の動粘性係数 ν は 20K での値 $\nu = 1.93 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ (表 1) で航行中は常に一定とした。また、液面は 1 次の振動モードのみが支配的であるとして、初期の振動モード係数を $\lambda_n=3.91$, $D_n=0.488$, $C_n=0.731$ として波高 η_0 を推定した。なお、これらの値は LH₂ の蒸発で液深比 $h/2R$ が変化すれば時々刻々と変動する。共振時の揺動周期 T_n が $T_n=2\pi/\omega_n=4.89\text{sec.}$ なので、海上の波の周期を $T_s=4.88, 6.50\text{sec.}$ の場合を想定する。 $T_s=4.88\text{sec.}$ の場合、初期の振動数比 Ω が $\Omega=1.00$ で共振により Sloshing が生じて、液面波高 η_0 が初期の静液面から天頂までの距離 $2R-h$ を大きく上回り Swirling が起こりタンク天頂壁面のほぼ全面を濡らすことになる。このときの速度 $\dot{\eta}$ は $\dot{\eta}=59.4\text{m/s}$ である。

Table 1 Chemical properties of liquid hydrogen at 20K temperature⁽²⁷⁾

Boiling point [K]	20.3
Density, ρ [kg/m^3]	71.3
Kinematic Viscosity, ν [m^2/s]	1.93×10^{-7}
Prandtl number, Pr	1.14
Thermal conductivity, λ [W/mK]	0.103
Latent heat, L [kJ/kg]	446

ここで、本研究では最も厳しい環境を想定しているので、Swirling によって蒸発した LH₂ が再び液化する現象⁽²³⁾については考えないこととする。

図 5 に Sloshing による液面運動のイメージを示す。断熱構造として PUF やアルミ層、真空空間などが利用される⁽⁵⁾。Swirling が生じるときは砕波とともに飛沫が

天頂壁面を廻る。

次に、球形タンク気相部壁面からの熱伝達を考える。まず、 $-\pi/2 < \theta < \beta$ の液相部の範囲では壁面から液体へ伝わる熱量は小さいものとみなし蒸発はないものとする^{(23), (24)}。Sloshing による液面の運動によって壁面からどの程度の熱量が液体に伝わるかに注目する。レイノルズ数 Re を以下の式で定義する。

$$Re = \frac{L_0 v \beta}{\nu} \quad (10)$$

代表寸法 L_0 は波高 η_0 が気相部 $2R-h$ より小さいときは $L_0 = \eta_0$ とし、波高 η_0 が $2R-h$ より大きいときは $L_0 = 2R-h$ としてみる。一方、伝熱工学資料など^{(25), (26)}によると平板の強制対流熱伝達のヌセルト数 N_u が以下の式で表される。

$$N_u = 0.332 P_r^{1/3} Re^{1/2} \quad (11)$$

表 1 に LH_2 の液温 20K における物性値⁽²⁷⁾を示す。 LH_2 のプラントル数は $P_r = 1.14$ なので、初期のヌセルト数 N_u は $N_u = 1.31 \times 10^4$ となる。天頂壁面の平均熱伝達係数を $\alpha_m [W/m^2K]$ とすると、 $\alpha_m = N_u \lambda / L_0$ より $\alpha_m = 2.92 \times 10^2 W/m^2K$ となる。ここで、 LH_2 の熱伝導率は航行中常に一定で $\lambda = 0.103 W/mK$ とした。

ところで、液面が運動しない静的な場合、気体に接している天頂壁面の温度 T_w が液面の温度 $T_L = 20K$ に比べて $\Delta T = T_w - T_L = 30K$ ほど高いことが計測実験から得られている^{(10), (28)}。本研究のように動的な液面運動の場合、Swirling が生じるような共振時は天頂壁面がほぼ常時濡れている状態である。図 5 に示すように、1.0m 厚の発砲体ポリウレタンフォーム(PUF)で外面真空断熱とし、内面が 20K で LH_2 への瞬間的極低温の繰り返し暴露の条件でタンク天頂部壁温 T_w の時間的変化をたどると、 T_w は数回の Swirling で T_L とほぼ同じになると考える。なぜなら、 LH_2 タンク断熱構造の外部からの入熱は高々 $0.005 W/m^2K$ とされている^{(23), (24), (29)} から

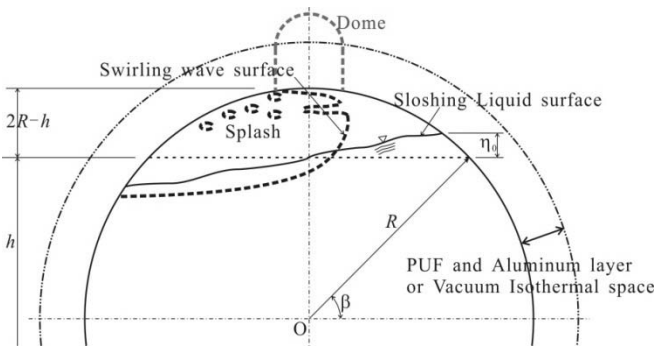


Fig. 5 Image of the wave movement of sloshing and swirling phenomenon in the spherical tank. PUF: Polyurethane foam.

である。そこで、ここでは計算上実機において最も過酷な厳しい環境を想定し天頂壁面に断熱破損部など予期しえない要因により温度差が生じるとし、 $\Delta T \cong 0.5K$ としてみる。

液面が Swirling によって壁面天頂を廻るときの伝熱面積 A を $A = 2\pi R L_0$ とする。1 日目の共振時の壁面からの伝熱量 q は $q = \alpha_m A \Delta T = 9.88 \times 10^4 W$ となる。また、液体水素の蒸発潜熱 L が $L = 446 \times 10^3 J/kg$ なので⁽²⁷⁾、単位時間の LH_2 の蒸発量 w は $w = q/L = 9.88 \times 10^4 / (446 \times 10^3) = 0.221 kg/s$ となる。ただし、この値は液深比 $h/2R$ や加振振幅 X_0 によっても大きく変化する。仮に、この状態が 24 時間継続すると 1 日目の蒸発量は $w = 1.91 \times 10^4 kg/day = 269 m^3/day$ となる。球形タンク内の液体の全容積が $V = 5.08 \times 10^4 m^3$ なので、結局 1 日目の BOR は $269 / (5.08 \times 10^4) = 0.515\%/day$ となる。

2 日目以降は LH_2 の量が減少して液体の固有周期 T_n が変化することで Ω が共振点 $\Omega = 1.00$ より大きくなるので蒸発量は減少する。

図 6 に南米パタゴニアから日本までの 20 日間のタンカーの航行中の Sloshing の周期比 $\Omega = T_n/T_s$ と液面波高 η_0 の変動を 1 日ごとにプロットしたものを示す。海上の波の周期 T_s が $T_s = 4.88 sec.$ のとき 1 日目に共振が起こり蒸発によって LH_2 量が大きく減少するので固有周期 T_n が変化して周期比 Ω が $\Omega = 1.0$ から日ごとに増加している。また、右軸の波高 η_0 は初期の共振時に天頂に達して Swirling を起こしたが、蒸発によって液体の固有周期 T_n が変化することで Ω が共振点 $\Omega = 1.0$ から徐々に増加している。

図 7 には BOR と充填率 γ の推移を示す。海上の波の周期 T_s が $T_s = 4.88 sec.$ のときは初期の BOR が 0.515% とかなり大きい。それに伴い、充填率 γ は初期の $\gamma_0 = 97.2\%$ が徐々に減少して、結局日本に到着する 20 日後には $\gamma = 95.5\%$ となり 2% 程度減少した。 LH_2 タンカーの概念設計時の BOR の目標値は $0.4\%/day$ 以下である^{(2), (5)} ので、初日は設計限界を上回る。海上の波の周期が一定でなく、時々刻々と変動すると BOR はさらに高い値を長期間示す危険性がある。また、波の速度 $\dot{\eta}$ は線形解析により推定した値であり、非線形項も含めた場合の $\dot{\eta}$ はさらに大きい値となり蒸発がさらに促進される。一方、海上の波の周期 T_s が $T_s = 6.5 sec.$ のときは振動数比 Ω が初期段階から共振点より遠いので、 Ω や波高 η_0 は変動しない。したがって、BOR は極めて小さいので初期の充填率 γ はほぼ一定に保たれる。このように、条件によっては Sloshing によって著しい量の LH_2 が蒸発してしまうが、海上の波の周期が一定であれば、蒸発現象はある期間に限定

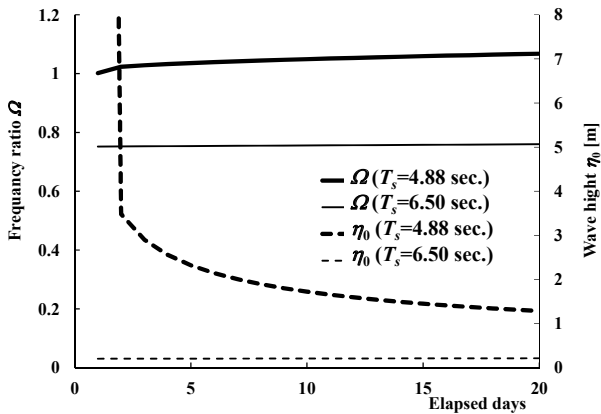


Fig. 6 Simulated variation of periodic ratio Ω and wave height η_0 [m], T_s : Sea wave period [sec.].

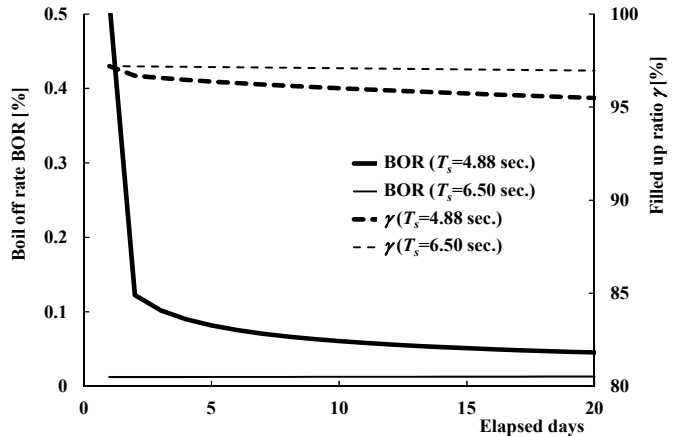


Fig. 7 Simulated variation of boil off vapor rate, BOR, and filled up ratio, γ .

されて生じるものと考える。

また、同様の手法で液深比 $h/2R=0.95$ 、初期振動数比 $\Omega \cong 1.0$ の場合のシミュレーションを行ったところ、やはり図 6, 7 と同じような傾向となった。液深によって共振点が変わることは、初期の LH_2 積み込みの量を決めるときに考慮すべきことを示唆しており、運航者の留意点として重要である⁽²⁹⁾。

一方、本実験によって得られた Swirling の画像観察によると、Sloshing によって砕波された液粒子が飛散し分散した液の表面積が増加する。そうすると、 LH_2 タンク天頂球面部から見た場合、低温液面が見かけ上増加して外部からの入熱が促される⁽²⁴⁾。さらに、飛散した液粒子は実際には図 5 に示すようにタンク上部の Dome 部の壁面にも達する。Dome 部は球形タンク上部から突出しているので、通常一般のタンクの気相部に比べて壁面の温度上昇は比較的大きい。そこへの砕波飛沫液滴はより蒸発しやすい。さらに、Dome 部には甲板から突入したステンレスかアルミ製のパイプ類が数本貫通しており、このパイプは外部からの伝導熱を有しているために温度レベルはかなり高い。そこに当たった液滴、波は即蒸発する。したがって、本研究で概算した BOR は実機で起こる現象において決して過度な危険予測ではないと考える。

ただし、各数値の妥当性についての検証は不十分である。一部、スロッシングによって液体がどの程度温度上昇するかについては水やエタノールをいれた魔法瓶の内部の温度上昇の実験を行い、24 時間で $2\sim 3^\circ\text{C}$ ほど上昇した⁽¹⁷⁾。今後、重要と考えられる新エネルギー技術に関する研究であるので現時点で客観性や妥当性が乏しくともひとまず実用化の可能性について議論すべきと考える。

いずれにしても、球形容器での LH_2 タンカー輸送で

Sloshing によって液面に激しい運動が生じると蒸発量が大きくなり、パタゴニアからの海上輸送時に LH_2 の量が大幅に減少してしまう可能性があることが分かった。さらに、もし、液体水素タンクとしてメムレン型を採用すると、上記に加えて壁面への Sloshing 衝撃圧で熱エネルギーが放出され蒸発がますます促進される^{(3), (7)}。

また、本研究では船体の運動として Swaying, Surging を想定したが、実際の LPG タンカーの運航海域では Pitching や Rolling の船体運動が顕著である⁽²¹⁾。Pitching の場合のタンク内の液面運動には揺動回転軸とタンクとの位置関係が大きく影響する^{(30), (15)}。したがって、この点に着目して球形タンク内の液体運動および相変化現象を捉えることも重要である。さらに、常温の水ではなく LH_2 の状態での Sloshing の実験的研究は多くの困難がともなう⁽²⁸⁾ が、今後、上記の熱工学的解析結果を検証するために詳細な実証実験を行う必要がある。この点については神戸大学海事科学研究科武田実氏が系統的な研究を実施中⁽³¹⁾であり、著者も研究分担者としてそのプロジェクトに参加している。

最後に、水電解水素の発生効率をいかに高めるかについても深く議論すべきである。この効率が高まればもはやパタゴニア風力水素に頼らずとも日本近海に設置される洋上レンズ風車⁽³²⁾⁻⁽³⁴⁾による水素が有力なエネルギー源となりうる。この点については九州大学応用力学研究所との共同研究として継続して実施中であり、さらに平成 24 年補正予算で本校に導入予定の再生可エネルギー発電設備を用いた電力による水素の発生効率向上および貯蔵運搬技術に関する研究開発を実施していく。

5. 結 論

次世代の水素エネルギー利用技術の推進のためには液体水素 LH_2 の輸送時の蒸発率 BOR をいかに低減するかが重要である。本研究ではアクリル製球形タンクの揺動実験・線形解析を行い、 LH_2 の BOR を振動・熱の連成シミュレーションにより概算し以下の結論を得た。

- 1) LH_2 の相変化による BOR の概算の根拠となる球形タンク内の液体運動についての力学的法則の妥当性を検証する実験として Swaying による Sloshing を行ったところ、球形タンク内の液面振幅を第 1 次モードのみの線形解析で推定できることが分かった。
- 2) 実船の球形タンク内で生じる相変化現象をシミュレーションするために、Sloshing にともない液面と壁面との伝熱現象が連成した場合の BOR を概算した。Swirling によって球形タンク内の液体が激しく運動すると BOR が著しく大きくなる可能性があり、条件によっては初期の積載量の 2% 程度が蒸発することが分かった。

謝 辞

本研究は佐世保重工業(株)との共同研究として行った。また、コモテクノ古林 義弘 氏から多くの助言を頂いた。さらに、科学研究費補助金 No. 24246143 「海洋と水素エネルギー：超伝導現象の水素製造・貯蔵・輸送」(研究代表者：神戸大学大学院 武田 実 教授)の補助により実験を行った。関係者各位に深く謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 村田 謙二：”特集 多様な水素製造及びセンサー技術 アルゼンチン・パタゴニアの風力を利用する水素製造”，燃料電池，Vol.6, No.2, (2006), pp. 27-33.
- (2) 太田 健一郎 ほか 5 名：”平成 17 年度調査報告書 05003143-0 「南米の再生化エネルギーを利用した水素の生産に関する調査 第Ⅱ部 アルゼンチンの風力/水素エネルギー生産の可能性調査」”，NEDO, (2006).
- (3) A. Abe, M. Nakamura, I. Sato, H. Uetani and T. Fujitani: “Studies of the Large-Scale Sea Transportation of Liquid Hydrogen”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 2, (1998), pp.115-121.
- (4) 横山 稔: “トピックス 最近のパタゴニアの状況(風速計設置に関して)”，水素エネルギーシステム，Vol.33, No.1, (2008), pp. 63-66.
- (5) 山下 巖 ほか: “平成 10 年度成果報告書「水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術(WE-NET) サブタスク 5. 水素輸送・貯蔵技術の開発 第Ⅱ編液体水素輸送タンカーの開発」”，NEDO-WE-NET 9852, (1999).
- (6) 神谷 祥二: “解説 液体水素コンテナの開発—液体水素の長所と短所—”，圧力技術，Vol. 42, No. 3, (2004), pp. 146-153.
- (7) Y. Rotenberg, M. Burrows and R. McNeil: “Vibration Effects of Boil-off Rate from a Small Liquid Hydrogen Tank”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.11, No.11, (1986), pp.729-735.
- (8) S. A. Sherif, N. Zeytinoglu and T. N. Veziroglu: “Liquid Hydrogen: Potential, Problems, and a Proposed Research Program”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 22, No. 7, (1997), pp. 683-688.
- (9) H. Norman Abramson: “The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers with Applications to Space Vehicle Technology”, NASA SP-106, (1966), pp. 111-113.
- (10) Matthew E. Moran, Nancy B. McNelis and Maureen T. Kudlac: “Experimental Results of Hydrogen Slosh in a 62 Cubic Foot (1750 Liter) Tank”, NASA Technical Memorandum 106625 AIAA-94-3259, (1994).
- (11) 姫野 武洋, 梅村 悠, 野中 聡, 渡辺 紀徳, 鶴沢 聖治: ”特集3:熱流体解析 伝熱を伴う Sloshing 現象の数値解析”，日本マイクログラフィティ応用学会誌，Vol. 26, No. 3, (2009), pp. 232-236.
- (12) 日本機械学会編: “事例に学ぶ流体関連振動 第2版”，技報堂出版, (2008), pp. 334-356.
- (13) Raouf A. Ibrahim: “Liquid Sloshing Dynamics -Theory and Applications-”, (2004), Cambridge University Press.
- (14) 小田原 悟, 岩本 才次: “Sloshing による圧力変動に及ぼす気体の性質の影響”，可視化情報学会全国講演会(鹿児島 2010)講演論文集, (2010), pp. 371-372.
- (15) 小田原 悟, 岩本 才次: “Sloshing による圧力変動に及ぼす回転中心の影響”，日本機械学会九州支部 64 期総会講演会論文集 No.118-1, (2011), pp. 231-232.
- (16) 小田原 悟: “Sloshing による衝撃圧力の推定”，日本機械学会年次大会講演論文集 CD-ROM, G100044, (2011).
- (17) 堂免 健太, 西村 隼人, “スロッシングの実験的研究”，2012 年度鹿児島高専機械工学科卒業研究, (2013-3).
- (18) 石本 祐樹: 海外再生可能エネルギーの大陸間輸送技術の経済性評価, 季報エネルギー総合工学, 34-2, pp. 42-52, (2011).
- (19) B. Budiansky: “Sloshing of Liquids in Circular Canals and Spherical Tanks”, *Journal of Aero Space Sciences*, Vol.27, No. 3., (1960)
- (20) Utsumi, M., 2011, "Theoretical Determination of Modal Damping Ratio of Sloshing Using a Variational Method," ASME J. Pressure Vessel Technology, 133, February, p.011301.
- (21) 井上 武彦, 村田 征一郎, 平松 良忠, 今北 文夫, 堀 徹, 新田 顕, 熊野 厚: “セミメンブレン LPG 船の就航中計測”，日本造船学会論文集, 第 150 号, (1982), pp. 333-340.

- (22)池田 良穂:”図解雑学 船のしくみ”,(2006), ナツメ社, pp. 148-149.
- (23)古林 義弘:“液体水素輸送船のタンクシステムの研究”, 日本造船学会論文集 第178号,(1995), pp.649-656.
- (24)古林 義弘:“低沸点液体タンクの圧力上昇について”, 西部造船会会報 第77号,(1989), pp. 147-159.
- (25)西川 兼康, 藤田 恭伸:“機械工学基礎講座 伝熱学”, (1982), pp. 110-181, 理工学社.
- (26)日本機械学会:“伝熱工学資料 改訂第5版”, 日本機械学会, p. 28, (2009).
- (27)National Institute of Standards and Technology, NIST: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>, (2010).
- (28)武田 実, 赤澤 輝彦, 岩本 雄二, 前川 政範, 風間 力: “水素エネルギー海上輸送のための基盤技術の開発研究—工学観測用液体水素実験装置の構築—”, 神戸大学海事科学部紀要 第2号, (2005), pp. 171-177.
- (29)古林 義弘 私信, (2011).
- (30)木村 康治, 高原 弘樹, 坂田 勝:”ピッチング励振を受ける容器内液面の振動解析(液面揺動の発生しない条件)”, 日本機械学会論文集(C編), Vol. 59, No. 565, (1993), pp. 2606-2612.
- (31)武田 実:海洋と水素エネルギー:超伝導応用の水素製造・貯蔵・輸送技術への新展開, KAKEN, <http://kaken.nii.ac.jp/d/p/24246143.ja.html>.
- (32)胡 長洪, 劉 成, 末吉 誠, 経塚 雄策, 大屋 裕二:波浪中洋上風力発電用浮体のCFDシミュレーション. 日本船舶海洋学会平成25年春季講演会, pp. 2013年5月, 広島.
- (33)末吉 誠, 胡 長洪, 原田 智広, 経塚 雄策, 大屋 裕二, 小林 正典, 安澤 幸隆, 岩下 英嗣, 肥後 靖, 池田 浩基, 柏木 正:洋上風力発電用セミサブ型三角形浮体の水槽実験, 日本船舶海洋学会平成25年春季講演会, 2013年5月, 広島.
- (34)経塚 雄策, 澤井 大介, 張 宏亮, 松原 監壮, 末吉 誠, 大屋 裕二:2012年台風16号来襲時の博多湾海上風力発電浮体の動揺と係留力, 日本船舶海洋学会平成25年春季講演会, 2013年5月, 広島.